

微小光点を得る方法について

第一報 顕微鏡を使用する方法

沼 田 正

Some Methods to obtain a Minute Light Spot Part 1. Method by Means of a Microscope

Tadasi Numata

We have used a microscope to converge a light passing through a comparative large pinhole into a very small light spot.

In this method, the magnification due to the lens is given by d/aM , where M is the magnification of the microscope under normal use, d the distance of distinct vision, and a the distance between the pinhole and the eye lens of the ocular.

By adopting a suitable objective ($4\times$, $10\times$), an ocular ($5\times$, $10\times$), a numerical value of a ($40\sim 70$ cm.) and a pinhole of 2mm. diameter, a light spot of about $1/2\sim 2$ mil diameter that was focused on a plate set up on the stage of the microscope could easily be obtained by paying some careful attention to adjustment for the microscope. The diameters of light spots which were obtained experimentally agreed with those expected by $d/(aM)$.

Of course, we can obtain a smaller light spot than the one of $1/2$ mil diameter by adopting a smaller pinhole than the one of 2 mm. diameter under the same conditions except the diameter of pinhole.

1 緒 論

最近シリコン、ゲルマニウム半導体の表面の極めて小さな領域を点状あるいは線状の光で照射することにより、これらの半導体の minority carrier の寿命の測定⁽¹⁾や、表面破壊現象⁽²⁾、及びその他を調べる実験⁽³⁾が行われている。

これらの実験の精度は照射した光の照射面積に依存しているから、実験の精度を上げるためには照射面積を極めて小さくすることが望ましいわけである。然しながら使用されている光学系を調べてみると、その殆んどがピンホール（あるいはスリット*）とカメラレンズを使用し、ピンホールを出た光をカメラレンズを使用して試料の表面上に結像させている。このような方

* 以下特にスリットについては断らないが、スリットについても同様のことが言える。

法で得られる光点(光像)の大きさは、(1)短焦点距離のレンズを使用する程、(2)ピンホールの大きさが小さい程、(3)ピンホールとカメラレンズとの距離が長い程小さくなることは明らかであるが、極めて小さな光点を作り、然も半導体表面上の希望する位置を正確に照射するには諸種の事情のために我々にとってはあまり好ましい方法とは思われない。

そこで我々は非常に小さな光点を簡単に作ることが出来、然も操作容易な方法はないかと考えてみたわけであるが、第二次大戦中ドイツで文書の秘密通信に使用した顕微鏡を使って文書を縮小する方法にヒントを得、ピンホールと市販の顕微鏡とを組合せた装置を使用して見た。即ち我々の方法は光源から出た光をピンホールを通して普通の顕微鏡の対眼レンズで受け、対物レンズを通して顕微鏡の載物机上にセットされた試料の希望する表面上に縮小して投影しようと言うわけである。実験の結果この方法により一応良好な結果が得られることが分ったので以下簡単にその概要を調べる。又上記のドイツ流の方法は最近カメラフィルムの分解能テストにも使用されている。(4)

2 倍 率

上記のように顕微鏡*を使用した場合の光像の大きさ及び光学系中の光線の経路は光がピンホールに入る前に使用されている光学系に依存するわけであるが、我々の場合は縮小度の程度を知れば足りるので、ピンホールは一個の小さな発光体のように取扱うことにする。かくすることにより計算は非常に簡単になる。又計算は第1図のような原理的な顕微鏡光学系について緒收差はないものと仮定して行なうことにする。我々の場合ピンホールの大きさは小さく、且つ対眼レンズから相当はなれた所にあるから光線は全て近軸光線になっている。

与えられた光学系で得られる最小の光点の大きさは顕微鏡によって得られる結像 $P''Q''$ により与えられる。従って光点の大きさの評価として結像の倍率を使用することが出来る。

顕微鏡の立場から言えば、第1図の F_1 , F_1' は夫々対物レンズ L_1 の第一焦点、第二焦点であり、 f_1 はその焦点距離、 F_2 , F_2' は対眼レンズ L_2 の夫々第一、第二焦点であり、 f_2 はその焦点距離である。 Δ は L_1 の第二焦点と L_2 の第一焦点との距離で光学的筒長である。(我々の場合には上記の関係は皆逆になるが顕微鏡を使用する関係上一応そのまゝの用語を使用することにする。)

ピンホールの半径を \overline{PQ} ($=X$) とし、 L_2 より見たその座標を a (P より L_2 の向きにはかる) とすれば、 PQ の L_2 による像 $P'Q'$ は倒立で、 L_2 による倍率 m_1 は

$$m_1 = -\frac{1}{a} \frac{f_2}{1-f_2/a} \dots\dots\dots(1)$$

となる。

$P'Q'$ の L_1 による像 $P''Q''$ も倒立であり、その倍率 m_2 は

$$m_2 = -\frac{f_2}{\Delta-\delta} \dots\dots\dots(2)$$

* 本論文での顕微鏡とは市販されている顕微鏡をさす。

となる。ここで δ は $P'Q'$ と F_2 間の距離であり、 $a \gg f_2$ のときは $\Delta \gg \delta$ となる。

(1), (2)式よりこの光学系の全倍率 m は

$$m = m_1 m_2 = \frac{1}{a} \frac{f_1 f_2}{(1 - f_2/a)(\Delta - \delta)} \dots\dots\dots (3)$$

となる。これは $a \gg f_2$ のときは近似的に

$$m = \frac{1}{a} \frac{f_1 f_2}{\Delta} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

然るにこの光学系を本来の顕微鏡として使用したときの倍率 M は

$$M = \frac{\Delta d}{f_1 f_2} = N_o N_e \dots\dots\dots (5)$$

$$N_o = \Delta / f_1$$

$$N_e = d / f_2$$

で与えられる。ここで d は明視の距離であり、 N_o , N_e は夫々対物レンズ、対眼レンズの倍率である。

我々の場合、 $a \gg f_2$ の条件で使用するので(5)を(4)に代入すれば、全倍率 m は

$$m = \frac{1}{M} \frac{d}{a} \dots\dots\dots (6)$$

で与えられることになる。即ち我々の場合の倍率は使用している対眼レンズ、対物レンズによる顕微鏡の倍率に逆比例するのみならず、 d/a に比例することが分る。

例として

$$N_o = 10\times, \quad N_e = 5\times, \quad d = 25 \text{ cm}$$

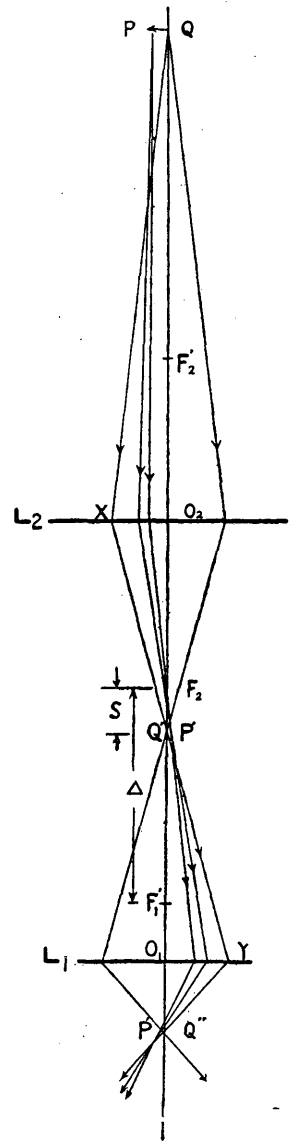
$$a = 50 \text{ cm}, \quad \text{ピンホールの直径 } 2X = 2 \text{ mm}$$

とすれば、得られる結像の直径は 0.02 mm となり、約 1 mil 弱である。(ここで N_o , N_e の値は顕微鏡の対物レンズ、対眼レンズに刻印してある値である。)

カメラレンズの場合には、倍率は $f/(f-a)$ で与えられるので、第1図 顕微鏡光学系の原理図及びその結像
 $f = 35 \text{ mm}$ とすれば、第一主点より $a = 50 \text{ cm}$ の距離の所にある直径 2 mm のピンホールの像は 0.15 mm 程度にしかない。又ピンホールの直径を変えないで、 0.02 mm の像を得るためには約 $3 \text{ m } 46 \text{ cm}$ はなさなければならない。我々の方法と比較すれば約 7 倍近くの a の値が必要になる。

3 光 像 の 照 度

対物レンズの半径を p とし、光軸上の Q 点を出た光線が顕微鏡の光軸となす角の最大なるも



のを U とする。このときの光線の経路は $QXQ'YQ''$ である。角 $XQ'O_2$ を U' とし、 $XO_2 = h$ とすれば

$$\left. \begin{aligned} U &= h/a \\ U' &= h/(f_2 + \delta) \\ U' &= p/(d - \delta + f_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

なる関係が得られる。

上式より

$$U = \frac{p}{a} \frac{f_2 + \delta}{d - \delta + f_1} \dots\dots\dots$$

が得られる。

(8)式は $a \gg f_2$ のときは、大体 $f_2 \gg \delta$, $d + f_1 \gg \delta$ と見做されるので近似的に

$$U = \frac{p}{a} \frac{f_2}{d + f_1}$$

あるいは

$$aU = \frac{pf_2}{d + f_1} \dots\dots\dots (9)$$

となる。

(9)式の aU は近似的に我々の場合の対眼レンズの射入瞳孔の半径であり、これは上記の条件のときには近似的に a に無関係である。

光像の平均の照度を Σ_1 、対物レンズの所の平均の照度を Σ_2 とし、光学系に入った光は反射吸収などの損失がないものとすれば

$$\Sigma_1 \left(\frac{d}{aM} \right)^2 X^2 = \Sigma_2 \left(\frac{pf_2}{d + f_1} \right)^2 \dots\dots\dots (10)$$

なる関係が得られる。

ピンホールを小発光体と見做したときの対物レンズの附近から眺めたその有効光度を I_e とすれば、 Σ_2 は近似的に

$$\Sigma_2 = I_e/a^2 \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。(11)は I_e を定義する式と見ることが出来る。)

(10), (11)式より

$$\Sigma_1 = I_e \left(\frac{1}{X} \frac{M}{d} \frac{pf_2}{d + f_1} \right)^2$$

となり、 Σ_1 は a には依存しないことになる。即ち光像の照度は光像を小さくしても変らない。 Σ_1 は I_e に比例するので明るい光点を得るためには I_e を大きくしなければならない。そのためには明るい光源を使用すると同時に適当な他の集光光学系を使用すればよい。(5)

4 実験装置及び実験

§3に述べたように顕微鏡を使用すると、あまり小さくないピンホールを用いても非常に小さ

な光像が得られることが分ったので、はたしてどの程度の光点を得られるか又実用性があるかどうかを実験してみた。使用した顕微鏡はオリンパス UCE で、これは十字動載物机を有している。光点の位置即ちX, Y 座標は附属の遊尺を使用して 0.1mm まで測定出来る。

実験の実験に際しては試料を適当に設計製作した保持器を用いて顕微鏡のこの机上にセットする、かくすることにより試料面上を顕微鏡で観察しながら希望する位置に一定の角度で光点を投影することが容易に可能である。オリンパス UCE は回转载物机になっているので、若し必要ならば光点を試料面上の任意の点のまわりに回転させることも出来る。

第2図は光像の大きさをテストする目的のために使用した実験装置である。全ての装置は光学台上に設置することが望ましい。差当っての実験では十字動載物机上にもプロセス乾板を設置し、光像を乾板上に結像させ、光像の写真を撮り（微粒子現象）、顕微鏡で拡大し光像の大きさを測定した。

焦点の調節は粗大焦準装置及び微細焦準装置（1目盛0.002mm）を使用して行なうことが出来るので、カメラレンズを使用した場合より容易である。焦点の微細調節は結像の様子をルーペで覗きながら行なうのであるが、非常に小さな光点を作る場合には、光点の周囲に生ずる光芒に煩されるために最小の光点を得るための調節は少々厄介である。

実験の結果、対眼レンズ4×, 10×, 対眼レンズ5×, 10×, 程度の組合せを使用し、 a を40~70cm 程度にとれば、直径2mmのピンホールを使用して $\frac{1}{2}$ ~2mil程度の光点は容易に得られることが分った。

第3図, 第4図, 第5図に得られた写真の例を示す。図中の線は光像を乾板上である速さで移動させたときに得られるものであり、丸は光像を一瞬静止させたときに得られたものである。丸、線共に相当のカブリを起しているので、それらの大きさが等しくなくなっている。

第3図のものは対物レンズ4×, 対眼レンズ10×, a は65cm, ピンホールの直径2mmを使用した場合に得られたものである。図中の尺度の一目盛は0.1mmである。得られた光線の直径はマイクロメーターを使用しての顕微鏡測定にすれば、約 $2 \times 10 \mu$ である（約1mil弱）。この値は(6)式を使用して得られる計算値 19μ と殆んど一致する。

第4図のものは対物レンズ10×, 対眼レンズ10×, その他は上記と同様のとき得られたものであり光線の直径は 10μ （約 $\frac{1}{2}$ mil弱）である。

第5図のものは対物レンズ4×, 対眼レンズ5×, その他は同様のとき得られたものであり光線の直径は 40μ （約2mil弱）である。何れの場合もその大きさは(6)式で与えられるものと殆んど一致する。

以上は比較的大きな直径のピンホールを使用した場合であるが、第二報で述べるような 100μ ~ 10μ 程度の小さな直径のピンホールを使用すれば上記の値よりも極めて小さな光像（ μ 程度及びそれ以下）が実際に得られる。但しこの場合には強い光源を用いる必要がある。

次にスリットの場合について簡単に述べる。我々の方法では、スリットの中が縮小されると

同時に長さも縮小されるので實際の使用に当っては比較的長い巾の狭いスリットを使用し、顕微鏡の倍率は20倍程度に小さくして使用の方が良い結果が得られるようであった。

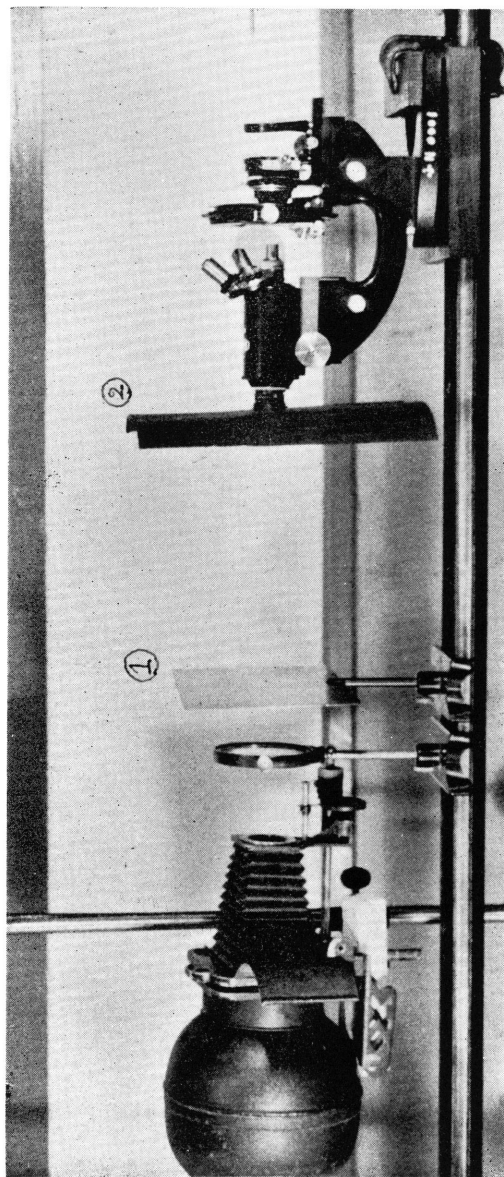
以上簡単な実験によって、市販の普通の顕微鏡をそっくりそのまま逆に使用することにより充分実用可能な微小光点が容易に得られることが分った。

5 結 言

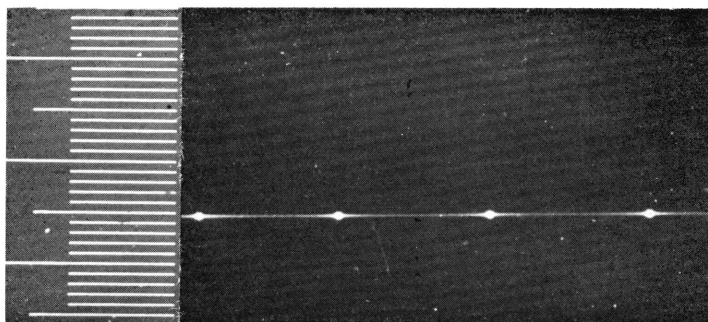
本実験を行なうに当り顕微鏡その他を心良く貸与された生物教室森田教授に感謝の意を表す。又本実験は半導体の表面現象の研究に関連して行なわれたものであり研究費の一部は文部省科学研究助成補助金より支出された。こゝにあわせて感謝の意を表する。

文 献

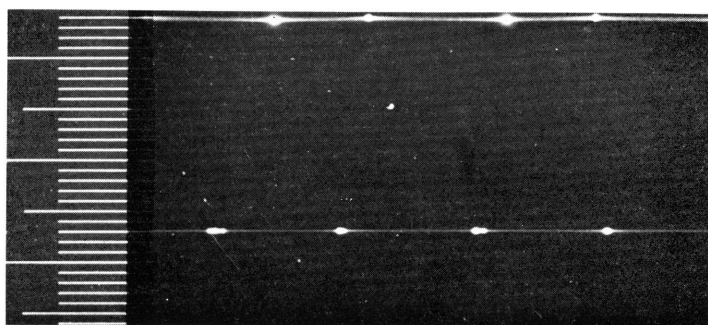
- (1) L. B. Valdes : Proc. I.R.E., **40** (1952) 1420
R. L. Watters, G. W. Ludwig : J. Appl. Phys. **27** (1956) 489
- (2) C. G. B. Garrett, W. H. Brattain : J. Appl. Phys. **27** (1956) 298
- (3) R. M. Page, R. W. Terhune, J. Hickmott, Jr. : J. Appl. Phys. **27** (1956) 367
- (4) P. Hariharan : J. Opt. Soc. Am. **46** (1956) 315
- (5) S.H. Gage, H. P. Gage : Optic Projection (1914)



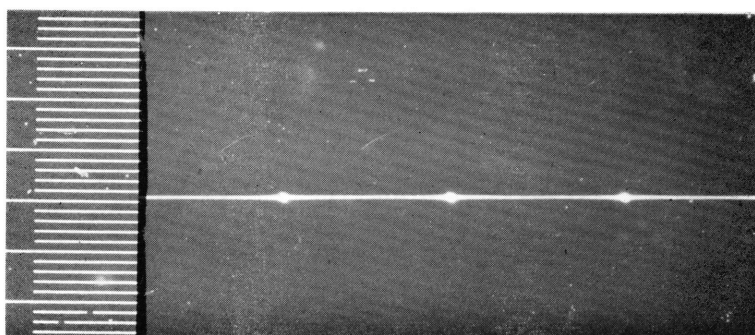
第2図．実験装置．①はピンホールを有する光の遮蔽板，②はピンホールを出た光の遮蔽板



第3図. 光点の写真. 対物レンズ $4\times$, 対眼レンズ $10\times$, $a=65cm$,
ピンホールの直径 $2mm$, 線の巾約 20μ



第4図. 光点の写真. 対物レンズ $10\times$, 対眼レンズ $10\times$, $a=65cm$,
ピンホールの直径 $2mm$, 線の巾約 10μ



第5図. 光点の写真. 対物レンズ $4\times$, 対眼レンズ $10\times$, $a=65cm$,
ピンホールの直径 $2mm$, 線の巾約 40μ